

Caractérisation en dynamique rapide du Ti-6Al-4V obtenu en Fabrication Additive par Faisceau d'Électrons

A. HIRICOIU^a, G. HAUGOU, J.D. GUERIN,
D. COUTELLIER, M. BIGERELLE, H. NACEUR, G. CORMORANT

a. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LAMIH CNRS UMR 8201, 59313
Valenciennes, France
alexandre.hiricoiu@univ-valenciennes.fr

Résumé :

Connus comme moyens de prototypage rapide, les procédés de fabrication additive ont aujourd'hui un intérêt capital pour l'industrie moderne qui souhaite étendre leurs utilisations pour la production de petites et moyennes séries. Il reste cependant des questions majeures sur les propriétés mécaniques des pièces ainsi obtenues. Les travaux d'analyses menés au sein du LAMIH portent sur l'étude du comportement dynamique d'éprouvettes en Titane Ti-6Al-4V produites par procédé de fabrication additive EBM (Electron Beam Melting). Les premiers résultats expérimentaux montrent que la vitesse de déformation n'a qu'une faible influence sur le comportement mécanique des éprouvettes. En revanche, la direction de fabrication de ces dernières apparaît être prépondérante quant à la tenue mécanique du matériau. Ce paramètre peut améliorer de 15% le comportement mécanique sous sollicitation dynamique. Des hypothèses quant au lien entre les modes de rupture et la direction de montage sont proposées.

Abstract :

Additive Manufacturing has been used for rapid prototyping of new products during development phase. Nowadays, modern industry is looking forward to involve the additive manufacturing process in production of small and medium series of products. However, some major questions about mechanical characterization of the process are still on the table. In this paper, dynamical behavior of Ti-6Al-4V obtained by EBM (Electron Beam Melting) technology has been investigated. At first, it is showed that the process does not considerably affect the rate sensitivity of the material. Nevertheless, it is appearing that direction in which the sample has been built is an extremely important factor that one must consider. This parameter can increase by 15% the mechanical behavior of the specimen under dynamic loading. An explanation has been found to explain linkage between failure mode and the building direction.

Mots clés : Ti-6Al-4V, Fabrication Additive, EBM, Dynamique Rapide, Barres de Hopkinson.

1 Introduction

Les technologies liées à la fabrication additive métallique présentent un grand intérêt pour l'industriel et leur développement requiert toute l'attention de la communauté scientifique et technique. Leur utilisation a rapidement évolué au cours des deux dernières décennies, en passant d'une réalisation des pièces de petites dimensions à une fabrication de pièces de plus en plus massives et de géométries plus complexes. Certains industriels du secteur aérospace ont ainsi franchi le pas en investissant dans d'importants parcs de machines destinées à la fabrication de petites et moyennes séries. Bien qu'actuellement très coûteuse, la technologie EBM (Electron Beam Melting) dispose d'un très grand potentiel pour occuper une place importante dans l'industrie de demain. Il apparaît cependant que la technologie EBM n'est pas suffisamment éprouvée et mature pour garantir une maîtrise complète du processus de conception et de fabrication des pièces. Les problématiques abordées concernent notamment le sens de montage, les liens entre les paramètres de fabrication et le comportement du matériau.

L'étude bibliographique a été axée sur les liens entre les paramètres de fabrication et le comportement en quasi-statique du matériau. L'influence de la direction de fabrication a fait l'objet de travaux récents qui ont montrés des caractéristiques mécaniques différentes selon la direction de fabrication des éprouvettes ^[1]. Ces différences sont attribuées à une microstructure fortement orientée selon la direction de montage. D'autres travaux, notamment ceux menés par Biamino ^[2] ont comparé deux techniques de fabrication additive : la fusion par faisceau d'électrons et la fusion laser. Ces travaux ont montré que la technique EBM engendre une plus faible porosité et un plus faible taux de pollution par l'oxygène. Il apparaît aussi que la microstructure est plus fine et homogène. Parmi les matériaux étudiés, le titane est un bon candidat pour les réalisations par fabrication additive de par ses performances en termes de résistance et de rigidités spécifiques ^[3]. Le secteur médical est avec celui de l'aéronautique, l'un des pionniers dans l'utilisation et l'analyse des techniques additives par EBM de ces matériaux, notamment pour la fabrication de structures de forme complexe à sections variables. Parthasarathy ^[4] fait notamment mention d'une comparaison des propriétés mécaniques sur des structures treillis pour deux formes géométriques différentes, pour le développement de prothèses adaptées à chaque patient. De manière plus générale, les travaux de Murr et al ^[5] présentent le potentiel des différentes technologies de fabrication sur lit de poudre en prédisant un changement important dans la manière de concevoir une pièce. Avec ces procédés, il devient en effet possible d'orienter et de contrôler la microstructure sur toute la pièce (notion d'architecture microstructurale) et par la même lui conférer des caractéristiques optimales. Des études montrent des caractéristiques mécaniques en quasi-statique équivalentes entre des échantillons obtenus par forgeage et d'autres obtenus par méthode additive EBM ^[6].

Dans ce contexte, l'objectif premier de cette étude est d'analyser le comportement du Ti-6Al-4V sous sollicitation en dynamique rapide. Deux directions de construction par addition de matière ont été utilisées lors de la fabrication d'éprouvettes de traction. Les résultats en termes de lois de comportement et de faciès de rupture sont étudiés de façon à déterminer l'influence de la vitesse.

2 Technologie EBM et dispositif expérimental de caractérisation à grande vitesse de déformation

La maîtrise du procédé passe avant tout par une certaine connaissance de la machine sur laquelle est réalisée l'éprouvette. Dans le cadre de cette étude, les pièces ont été produites sur une machine de type

industriel. Nous allons décrire le procédé de la fusion de poudre par faisceau d'électrons, ainsi que le dispositif expérimental de caractérisation à grande vitesse de déformation des barres d'Hopkinson.

2.1 Procédé de fabrication additive

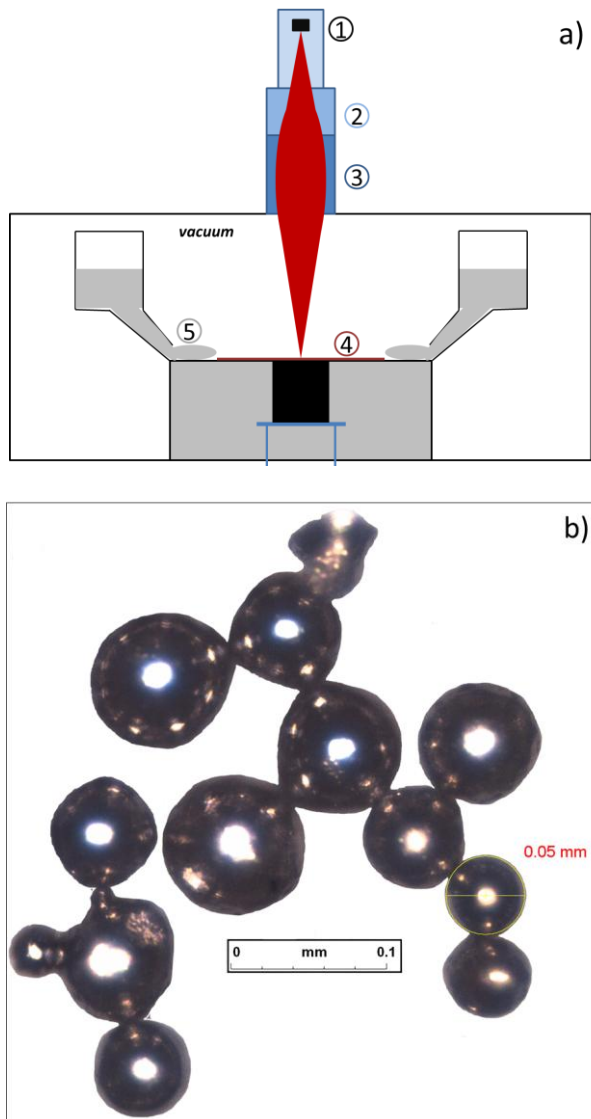


Figure 1 : Système EBM (a). Poudre de Ti6Al4V atomisée photographiée au microscope optique (x50) (b)

Lorsque le processus est achevé, on obtient un bloc composé d'une enveloppe constituée d'un aggloméra de poudres non fusionnées et de la pièce fabriquée. La troisième et dernière étape consiste à désolidariser les deux parties par sablage en projetant des poudres de la même qualité que celles employées lors de la fabrication. La rentabilité industrielle du procédé nécessite de récupérer les poudres non fusionnées et de les réutiliser pour de futures productions. Il est néanmoins fréquent qu'une partie de ces poudres soit oxydée et que certaines d'entre elles soient toujours partiellement frittées (figure 1b).

2.2 Elaboration d'éprouvettes de traction axisymétriques

Les éprouvettes utilisées sur les barres d'Hopkinson sont classiques, axisymétriques de type altère avec un corps d'épreuve cylindrique. Pour cette étude, les éprouvettes ont été montées suivant deux

La figure 1a donne le schéma de principe de la machine de type EBM - A1[®] (société ARCAM AB[™]). Le faisceau d'électrons est généré à l'aide du canon (1), celui-ci transite ensuite dans un champ électromagnétique appelé lentille (2) afin de concentrer le faisceau. Un second champ électromagnétique (3), piloté par un logiciel intégré, dirige le faisceau vers la surface cible (4). La technologie est dénommée « fusion sur lit de poudre » car des microbilles (5) sont étalées par couches successives lors des étapes du procédé de fabrication. Ces billes, dénommées poudres dans la suite du document, répondent à une distribution gaussienne centrée sur la valeur de 80 μm. La figure 1b donne un aperçu de la morphologie des poudres utilisées. On observe que toutes les billes sont globalement sphériques et que certaines forment des amas induits par l'utilisation d'une poudre recyclée.

La fabrication additive par EBM se déroule en trois étapes. En premier lieu, la poudre est étalée et nivelée par un système mécanique. Ensuite, cette poudre est balayée par le faisceau d'électrons à une vitesse linéaire de ~5 m/s avec un courant d'intensité élevée. L'étape a pour objectif de consolider par un léger frittage les poudres entre elles à une température de ~750 °C. Dans une seconde étape le courant et la vitesse du faisceau sont réduits pour fabriquer la pièce par fusion des poudres en respectant la topologie de la maquette numérique.

orientations différentes de leur axe par rapport à l'axe du faisceau. La figure 2 illustre les deux types de montage : normal de type A et axial de type B.

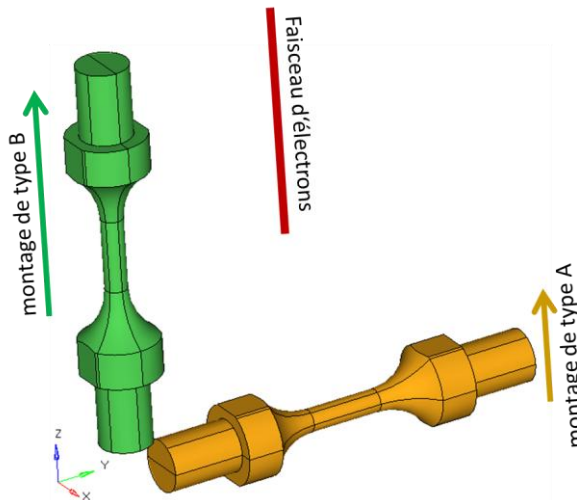


Figure 2 : Schéma de principe de la réalisation des éprouvettes : montage normal (type A), montage axial (type B)

Des observations rapides sur le lot produit permettent de se rendre compte que la fabrication des éprouvettes de type A est plus délicate et engendre des états de surfaces dégradés par rapport aux éprouvettes de type B. La partie centrale de l'éprouvette nécessite en effet que des supports soient créés lors de la fabrication pour garantir un certain respect des tolérances sur la pièce produite. Aujourd'hui encore, le retrait de ces supports est problématique car ils détériorent grandement l'état des surfaces impliquées. De manière générale, sur toutes les éprouvettes on observe à la surface du produit la présence de poudres partiellement fusionnées qui demeurent. Ceci confère un état de surface pouvant être qualifié de mauvais pour l'ensemble des éprouvettes.

Il est important de préciser que les formes géométriques obtenues dépendent de la bonne connaissance des distorsions thermiques engendrées par le faisceau d'électrons. Dans ce contexte, le montage de type A occasionne une modification plus marquée des tolérances de forme sur l'éprouvette, notamment dans la réalisation des diamètres nominaux.

2.3 Essais aux Barres d'Hopkinson

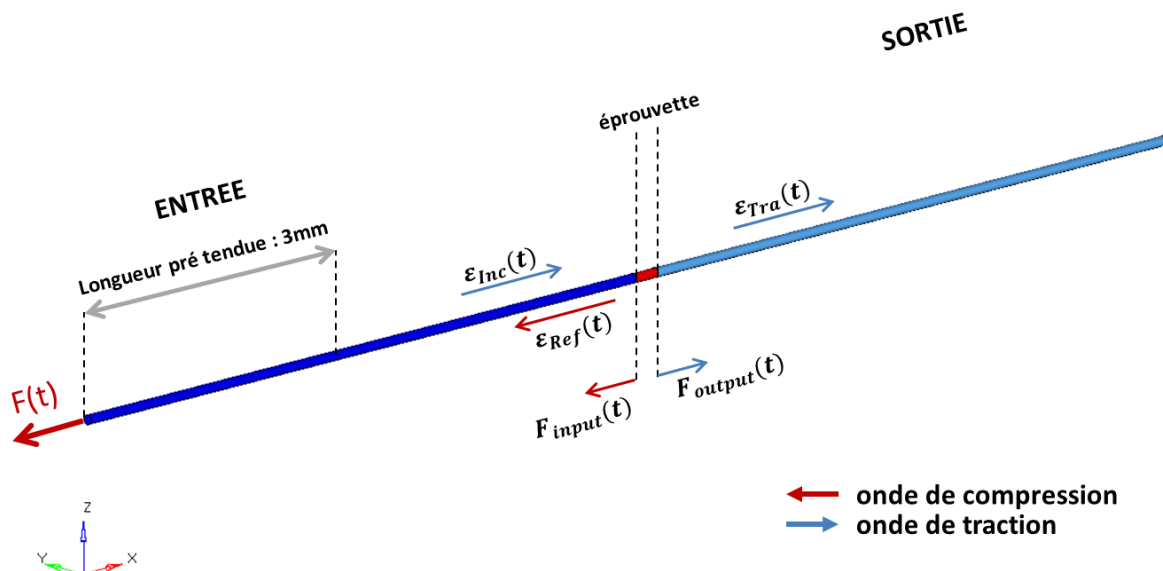


Figure 3 : Dispositif d'essai de traction dynamique par barre prétendue

La figure 3 schématise le dispositif expérimental ^[7] utilisé pour solliciter les lots d'éprouvettes sous chargement dynamique de traction. Celui-ci est composé d'une barre d'entrée (7.5m) et d'une barre de sortie (7m) ayant chacune un diamètre de 11mm. Ces barres sont en acier de type MARVAL 18 et permettent de tester une large gamme de matériaux aux caractéristiques mécaniques élevées comme du titane fabriqué avec le procédé EBM. Un ensemble de vérins hydrauliques est utilisé pour la mise

en tension d'une partie de la barre d'entrée et un fusible permet de relâcher cette pré tension de façon brutale permettant de générer un train d'ondes élastiques (ε_{inc} , ε_{ref} , ε_{tra}).

Ce type de dispositif expérimental dit à barres de Hopkinson est largement décrit dans la littérature [8] et seule la partie des équations relatives à la détermination de la contrainte et de la vitesse de déformation sera reprise ici. En considérant un équilibre entre l'effort d'entrée et de sortie, on peut exprimer directement la contrainte nominale σ dans le corps d'éprouvette en fonction de son module d'Young E , du rapport de la section des barres A à la section de l'éprouvette A_s et de l'onde transmise $\varepsilon_{Tra}(t)$ mesurée.

$$\sigma(t) = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_{Tra}(t) \quad (1)$$

La vitesse de déformation nominale de l'éprouvette est quant à elle fonction de la célérité de l'onde incidente C_0 , de la longueur initiale utile de l'éprouvette L_0 et de l'onde élastique réfléchie $\varepsilon_{Ref}(t)$:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L_0} \varepsilon_{Ref}(t) \quad (2)$$

À partir des équations (1) et (2), il est alors possible de déterminer la contrainte en fonction de la déformation du matériau, par intégration temporelle de l'équation (2).

3 Résultats et discussion

Trois vitesses de déformation ($75s^{-1}$, $250s^{-1}$ et $770s^{-1}$) ont été utilisées pour caractériser le comportement viscoplastique du matériau. On souhaite ainsi observer si les procédés additifs confèrent une dépendance à la vitesse de déformation pour des matériaux qui ne sont pas traditionnellement connus pour y être sensibles.

3.1 Influence de la vitesse de déformation

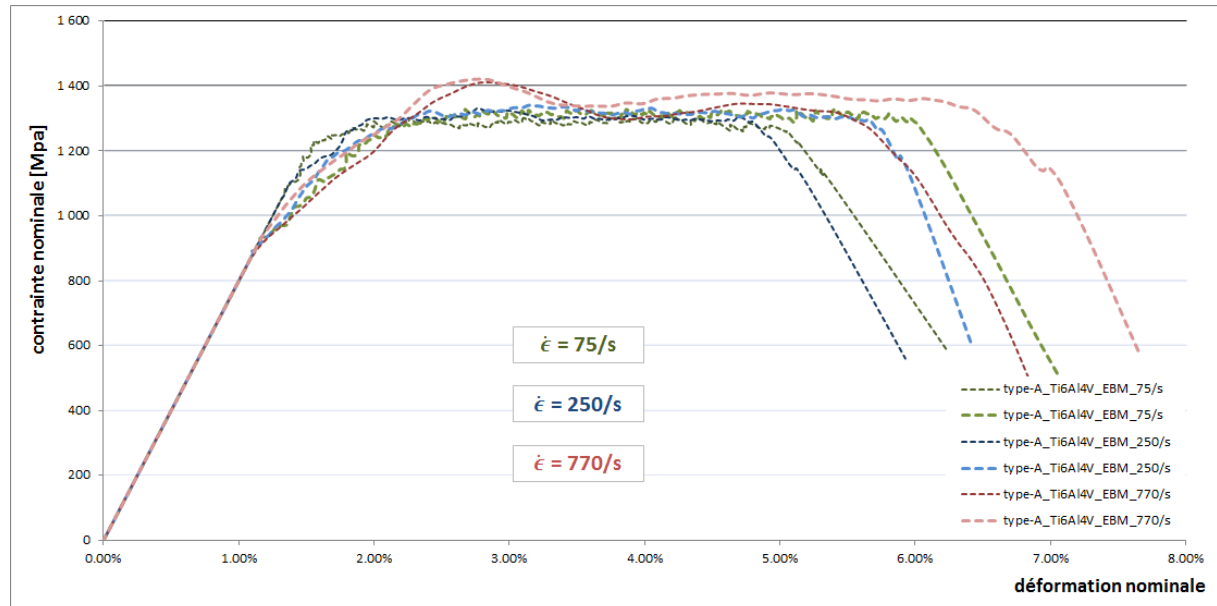


Figure 4: Courbe contrainte nominale en fonction de la déformation nominale : influence de la vitesse de déformation, Ti-6Al-4V, montage type A

Les résultats présentés figure 4 montrent une très grande reproductibilité des essais. Un soin particulier a en effet été apporté pour s'assurer que la localisation des échantillons dans le « build » ne soit pas un paramètre impactant sur les résultats obtenus (distribution sur tout l'espace). Ces résultats montrent

que la vitesse de déformation n'influe pas significativement sur le comportement plastique du matériau, confirmant ainsi la quasi-insensibilité du Titane à la vitesse de déformation. L'allongement à rupture se situe en moyenne autour des 6% de déformation ce qui peut paraître faible en rapport avec celui obtenus en quasi-statique par Arcam ABTM (~15%) [9]. Ces différences sont sans doute dues à un taux d'oxygène élevé dans ces poudres recyclées qui influe fortement sur l'allongement à rupture de ce type de matériaux. Il est à noter que la déformation plastique se fait à contrainte d'écoulement quasi-constante pour toutes les vitesses de déformation.

3.2 Influence de direction de fabrication

Les courbes présentées en figure 5 montrent une différence importante de comportement entre les éprouvettes de type A (traits pointillés) et celles de type B (traits pleins).

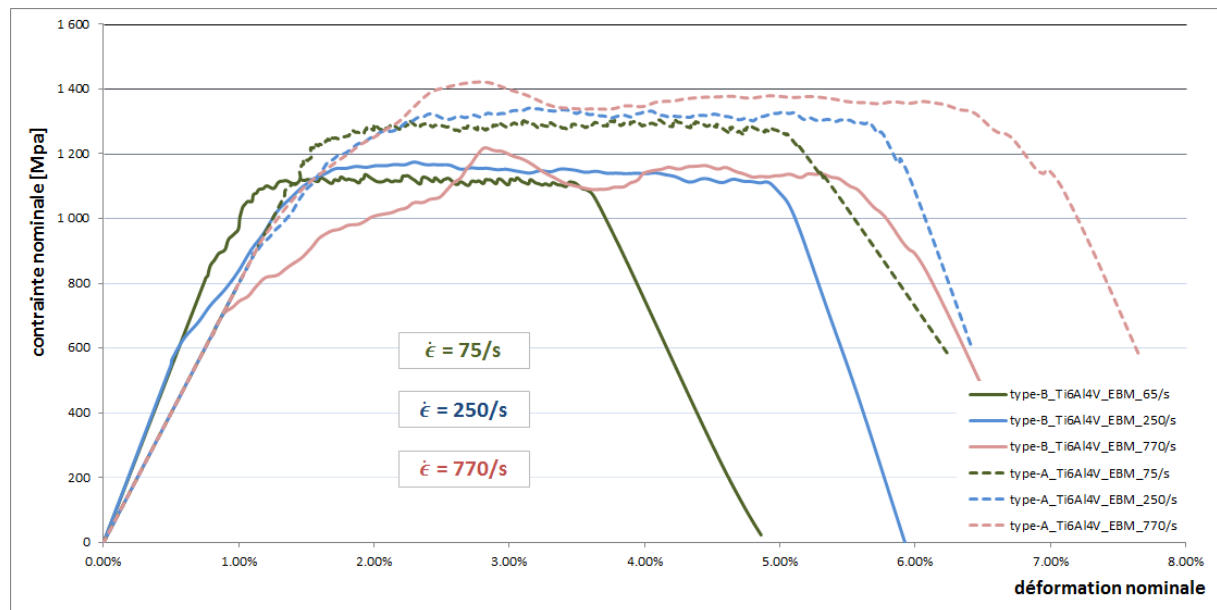


Figure 5 : Comparaison entre les éprouvettes fabriquées en dynamique rapide pour différentes vitesses de déformation

La contrainte à rupture des échantillons produits en montage A est plus élevée d'environ 15% par rapport à celle de leurs homologues conçus en montage B. Ces résultats sont un peu surprenants puisque l'on aurait pu s'attendre à une meilleure résistance des éprouvettes de type B étant donné leur meilleur état de surface. Si les aspérités de surface jouent un rôle dans la création des mécanismes de fissuration qui conduisent à la rupture, il est probable que d'autres effets liés à la technique de fabrication jouent un rôle antagoniste. Une des causes retenues selon Rafi [1], est d'origine microstructurale. En effet, dans le cas d'un montage de type B une fissuration en mode I est probable du fait de l'orientation normale à la sollicitation des couches successives et mène à une contrainte à la rupture plus faible que dans le cas de montage en type A.

3.3 Faciès de rupture

L'observation de la cinématique de déformation à grande vitesse (figure 6) révèle un comportement à la rupture de type fragile. Sur l'imagerie prise à la binoculaire (figure 7), on voit que la rupture s'effectue par fissurations différées. Dans le cas de la fabrication de type B (figure 7b), la couronne observée sur tout le pourtour de l'éprouvette correspond à la première rupture. La rupture franche a lieu dans un second temps en partie centrale de l'éprouvette.

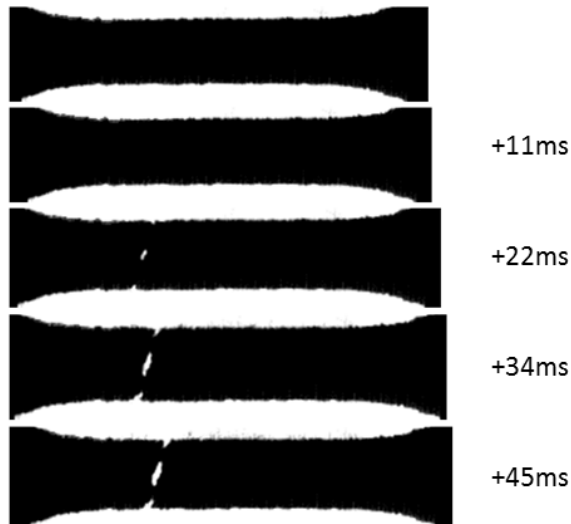
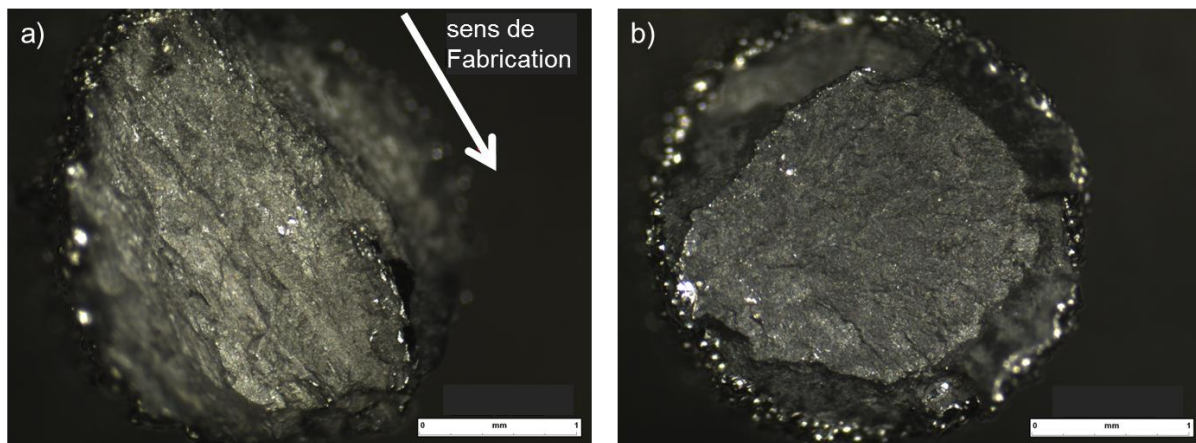


Figure 6 : Evolution temporelle de la rupture du corps d'éprouve lors d'un essai dynamique.

Le même type de mécanisme est observable sur les éprouvettes produites suivant le montage type A (figure 7a), à la différence que le profil central est moins régulier et présente une forme plus proche de l'ellipse. Cette rupture différée est sans doute due à un historique thermique différent entre les zones concernées et les zones centrales. On notera que cette ellipse est orientée dans les cas de montage type A par son grand axe dans le sens de montage des couches successives. On note la présence de stries parallèles à la direction de fabrication, pour les éprouvettes type A. Celles-ci n'apparaissent pas dans le montage type B, ce qui laisse penser à une propagation de fissure entre deux couches successives.



**Figure 7 : Observations à la binoculaire de la zone de rupture
a) éprouvette montage normal type A b) éprouvette montage axial type B**

4. Conclusion

L'objectif de ce premier travail est de compléter les résultats déjà présents dans la littérature sur le titane produit par technique EBM, par caractérisation dynamique. Une première étude en ce sens est décrite ici. Il est montré que dans le cas dynamique les différences entre les deux directions de fabrication extrêmes (horizontale et verticale) ne se résument pas aux propriétés mécaniques fondamentales. Cela implique également des modes de ruptures différents entre ces deux directions.

Il a été mis en avant que le Ti-6Al-4V produit par fusion de faisceau d'électrons sur lit de poudre n'est pas un matériau particulièrement sensible à la vitesse de déformation.

En comparant directement les orientations verticales et horizontales, on observe un gain sur la limite à rupture d'environ 15% pour les éprouvettes fabriquées à plat. Ces résultats sont déjà présents dans la littérature pour le cas statique, ce qui conforte les analyses alors effectuées et la complète dans le cas dynamique.

Enfin, l'observation des faciès de ruptures démontre que les éprouvettes cassent suivant des modes de fissurations différées. L'analyse des profils de rupture met en évidence les deux directions de fabrication. Dans le cas d'une éprouvette produite suivant un montage type B, on observe une rupture différée au centre. Ces différences s'expliqueraient sans doute par le fait que l'historique thermique

dans les deux cas soit différent ce qui peut induire des structures cristallines et donc des propriétés mécaniques différentes.

Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce aux collaborations avec notre partenaire industriel ainsi que le laboratoire G-SCOP à Grenoble qui a réalisé les éprouvettes en titane utilisées dans la campagne expérimentale.

Références

- [1] K. Rafi, T.L. Starr, B. E.Strucker, Mechanical property evaluation of Ti-6Al-4V parts made using Electron Beam Melting, Department of Industrial Engineering, University of Louisville, Louisville, KY 40292, 2012.
- [2] S.Biamino, A.Penna, U.Ackelid, S.Sabbadini, O.Tassa, P.Fino, C.Badini, Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*, 19(6), 776-781, 2011.
- [3] G.Lütjering, J. C. Williams, *Titanium* (Vol. 2), Berlin: Springer, 2003.
- [4] J. Parthasarathy, B.Starly, S. Raman, A.Christensen, Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM), *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 3(3), 249-259, 2010.
- [5] L. E. Murr, S. M. Gaytan, D. A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K. N. Amato, R. B. Wicker, Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14, 2012.
- [6] X.Gong, T. Anderson, K.Chou, Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology, In *ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation* (pp. 507-515), American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [7] F.LAURO, D. MORIN, G. HAUGOU, B. BENNANI, Application of SEE method on multiphase steel, *SEM Annual Conference*, Albuquerque, Nouveau Mexique, USA, 2009.
- [8] H.Kolsky, An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 62(11), 676, 1949.
- [9] Arcam AB™, Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf, document disponible en ligne.